OSS を用いた数値シミュレーションからの音場合成手法に関する検討

METHODS FOR SYNTHESIZING SOUND FIELDS FROM NUMERICAL SIMULATION USING ORTHOSTEREOPHONIC SYSTEM (OSS)

渡辺 充敏*, 木村 翔**, 坪井 政義***, 平野 滋****
Mitsutoshi WATANABE, Sho KIMURA, Masayoshi TSUBOI
and Shigeru HIRANO

The authors examined adequate solid angle partitioning methods and simple methods to predict the time from the reflection of sound in rooms until diffusion is attained in order to apply reverberation addition methods taking the reflection time structure previously proposed by authors into consideration to numerical simulation. We furthermore pointed out the effectiveness of reverberation addition methods by means of comparative hearing tests using sound fields synthesized from impulse response of reverberation added to early reflections from numerical simulation and actually measured impulse response.

Keywords : OSS, Synthetic sound field, Head related transfer function, Reverberation addition method

OSS、合成音場、頭部伝達関数、残響音付加手法

1. はじめに

図面段階のホールの音を数値シミュレーション結果から合成し、個々の音響物理指標値等からは把握しにくい音場の諸特性について聴感上の検討を加える音場合成システムは、有効な音響設計支援技術の一つとして利用されている¹⁾。

三次元的な拡がりを持つ音場を合成するためには、数値シミュレーションにおいて、受音点を中心とした空間を有限な範囲の立体角で分割し、分割された立体角に対応する方向ごとのインパルス応答を算出する必要がある。この際、立体角の分割を細かくすれば、より細かい方向情報を受聴者に提示できると考えられるが、必要以上に細かい分割は、数値シミュレーションの負荷となり、計算時間の増大につながるため好ましくない。音場合成システムを音響設計の際に生ずる試行錯誤に迅速に対応するシステムとするには、方向情報を扱う際の立体角の分割は、実音場と聴感上の差が生じない範囲内で荒く分割するのが望ましい。

実音場と聴感上の差が生じないように立体角を分割する方法として、人の方向知覚能力に基づく方法が考えられる。単一音源による音の方向弁別限については、多くの測定が試みられている²⁾が、数値シミュレーション時の立体角の分割のために必要となる、受音点を中心とした上半球に渡る方向弁別限の測定結果は見あたらない。

複数の音源が存在する実音場を想定して、飯田らは、見かけの音源の幅の変化と両耳相関度の関係に着目し、水平方向に対する立体角の分割方法を検討している³⁾が、両耳相関度に基づく場合、正中面における両耳相関度は等しくなるため、正中面の仰角方向を分割することは出来ない。

筆者らは、これまで音響設計支援システムの一部として、OSS⁴⁾を用いた再生方法による音場合成システムを開発してきた。現在、波面積分法⁵⁾と呼称する波動性を考慮した数値シミュレーション手法を用いて、方向別のインパルス応答から音場合成に必要な両耳におけるインパルス応答を算出しているが、立体角の分割を等立体角として分割していたため、受聴者の方向知覚能力を考慮した合理的な分割ではなかった。

また筆者らは、インパルス応答算出に要する計算時間短縮のため、実測のインパルス応答を用いた場合の、反射音時間構造を考慮した残響音付加手法について新たな提案を行い、実測音場との比較聴感実験を通してその有効性を示すことができた⁶⁾。しかしこの場合、初期反射音に残響音を付加する直接音からの時間は、実測の短時間指向拡散度の時間変化⁷⁾を手掛かりとしており、提案した残響音付加手法を数値シミュレーションからの音場合成に適用するには、音場が拡散状態に到達したと見なされる時間を予測し、残響音を付加する時間を明確

* 大林組技術研究所 副主任研究員・博士(工学)

** 日本大学理工学部 教授・工博

*** 大林組技術研究所 主任研究員・博士(工学)

**** 大林組技術研究所音響・電磁研究室 室長・工修

Deputy Chief Research Engineer, Obayashi Corp. Tech. Res. Inst., Dr. Eng.

Prof., College of Science and Technology Nihon Univ., Dr. Eng.

Chief Research Engineer, Obayashi Corp. Tech. Res. Inst., Dr. Eng.

Manager of Acoustic & Electromagnetic Eng. Dept., Obayashi Corp. Tech. Res. Inst., M. Eng.

にするとともに、実測のインパルス応答を用いて検討してきた残響音付加手法が数値シミュレーションのインパルス応答に対しても有効であるかを聴感実験を通して検討する必要があると考えられる。

そこで本論文では、OSS等のトランスオーラル系の再生手法を用いた音場合成システムにおいて、両耳でのインパルス応答の算出に必要な頭部伝達関数を数値シミュレーションへ組み込むために、方向知覚能力に基づく立体角の合理的な分割方法について検討している。

また、数値シミュレーションによる初期反射音に残響音を付加する時間を算定するため、室内が拡散状態に到達するまでの時間の簡易的予測手法について検討している。

さらに、数値シミュレーションによる初期反射音に反射音時間構造を考慮した残響音を付加して作成したインパルス応答からの合成音場と実測のインパルス応答からの音場を用いた一対比較聴感実験から、提案した残響音付加手法の数値シミュレーションへの適用の有効性について検討している。

2. 立体角の分割

被験者を中心とした上半球方向からの単一音源による方向弁別限の測定結果から、方向弁別能力の全体的な傾向を捉え、これとみかけの音源の幅を手掛かりとした複数音源による方向弁別限の測定結果を合わせて検討し、数値シミュレーションに頭部伝達関数を組み込むための立体角の分割方法を決定することにした。

2.1 単一音源による方向弁別限

実験は無響室内で行った。上半球全体に渡る方向弁別限を測定するために、図1に示す7個のスピーカを、それぞれ4.4度の角度をつけて取り付け、スピーカアレイを上下方向に回転するブームに取り付け、任意の角度に固定できる装置を用いた。仰角方向の変化はブームを上下に回転させることにより、水平方向の変化はスピーカアレイの焦点に位置する被験者自身を回転させることにより行った。

試験用信号にはホワイトノイズを用い、実験は適応法によった。スピーカアレイ中心のスピーカを基準方向とし、中央の基準スピーカから1.2秒間ホワイトノイズを提示し、1秒間の休止時間において、比較する他のスピーカから同様に1.2秒間ホワイトノイズを提示する。基準スピーカと比較スピーカからの提示を一对とし、被験者が「方向の違いが分からない」と判定したときは、基準スピーカに対する比較スピーカの変化角度を増加させ、「分かる」と判定したときは減少させる。これを繰り返し、3回連続して判定が入れ替わった角度の中間をもって方向弁別限とした。なお、ホワイトノイズ出力時の被験者頭部中心位置におけるスピーカアレイの周波数特性は、200Hz～10kHzにおいて ± 5 dBに収まっている。

基準スピーカに対する比較スピーカの変化方向は、水平および垂直方向の2通りとした。水平方向の方向弁別限の測定の際はスピーカアレイを水平に設置し、垂直方向の測定の際は垂直に設置した。基準スピーカの位置は、図2に示すように、水平角、仰角とも30度おきとしたが、仰角90度の基準位置における水平方向の変化に関しては、垂直方向の変化と同じになるため測定していない。被験者は水平方向の変化に対しては10名、垂直方向の変化に対しては6名である。また、実験中は、頭部を固定するとともに、スピーカアレイの焦点と頭部中心がずれないように、被験者は被験者前方のパイプにアゴを載せることとした。

図1 実験に用いたスピーカアレイ

図2 基準スピーカの位置

図3 実験値および標準偏差

図4 水平および垂直方向の方向弁別限の傾向

各測定方向について、全ての被験者のデータを単純平均し、方向弁別限とした。図3に水平面、正中面方向における実験結果および各被験者の弁別限による標準偏差を示す。

図4に実験結果をスプライン補完して得られた全体の傾向を示す。これを見ると、水平方向の弁別限は前方で最も小さく約2度となり、横方向では大きくなるが、後方になるにしたがい再度小さくなっている。

垂直方向では、水平角90度において仰角による変化は小さいが、その他の水平角では仰角が大きくなるほど大きくなる傾向を示しており、真上では最大の約9度となっている。

2.2 複数音源による到来角度の弁別限

実音場では、単一方向から音が到来することではなく、直接音に続き複数の反射音が時系列上で分離せずに知覚される。このとき音像自体が拡がりを持って知覚されることが広く知られており、立体角の分割を複数音源による到来角度の弁別限に基づいて分割すれば、単一音源の方向弁別限に基づく分割より荒くてもよいことが推測される。そこで、単一音源による方向弁別限測定結果とあわせて立体角の分割方法を決定するために、直接音と複数の反射音が同時に存在するとき、音像の見かけの幅を変化させない反射音の到来角度の幅を、水平面上の代表方向について測定した。

実験は無響室において行った。図5に実験ブロックダイアグラムを示す。まず、正面スピーカDから直接音を出力し、左右対称の位置に設置した一組のスピーカから反射音を出力する。反射音の基準方向は $\pm 45^\circ$ (スピーカA) および $\pm 135^\circ$ (スピーカB) の2パターンとした。直接音スピーカと、基準方向に設置された一組のスピーカである基準スピーカの組み合わせによる音場と、直接音スピーカと基準スピーカから角度を変化させたスピーカとの組み合わせによる音場を一对として提示し、この一对の音場の比較において変化角度を5度ごとに増加、減少させたとき、見かけの音源の幅の変化が判別できるかを被験者に回答させた。実験は適応法により、被験者の回答が同じ角度で3回程度入れ替わった角度の間をもって弁別限とした。

試験音は、無響室録音のモーツァルトの弦楽四重奏曲「ディベルティメント」第三楽章に、大規模シューボックスホールの一階中央付近における正四面体頂点法による測定から得られた方向別のパルス列(エネルギーパルス応答)の初期反射音部(直接音より180msec. まで)を直接音と左右の基準方向を中心とした45度の範囲内を通過して受音点に到達してくる反射音に分けてそれぞれ畳み込んで作成した。基準となる音場と比較する音場の提示時間はともに約8秒、音場と音場との休止時間は約2秒、再生レベルは約65dB(A)とした。被験者は成人男女11名である。各被験者の弁別限の単純平均を取り、基準方向の弁別限とした。

表1に測定結果および各被験者の弁別限による標準偏差を、単一音源による方向弁別限測定結果と合わせて示す。なお、両者とも方向の違いを判別できない角度の幅として示しているため、単一音源の弁別限は前項で示した値の倍となっている。表1を見ると、基準方向45度および135度における方向弁別限は、単一音源の約3倍になっている。複数音源における弁別限の測定は、水平面上の2基準方向のみであったが、本シミュレーション手法においては単一音源による方向弁別限を全方向に対して3倍の割合で拡げたものを複数音源の方向弁別限とみなすこととした。

図5 実験ブロックダイアグラム

表1 単一音源と複数音源の方向弁別限の比較

測定方向	単一音源	複数音源	標準偏差
45°	5.5°	16°	2.62°
135°	6°	19.8°	4.16°

図6 単一音源の方向弁別限に基づく立体角の分割

図7 複数音源による到来角度弁別限に基づく立体角の分割

図8 単純化した立体角の分割

2.3 立体角分割方法

図6に単一音源による方向弁別限の測定結果からの立体角分割の様子をメルカトル図法により作成したものを示し、これを3倍して得られた複数音源における立体角分割の様子を図7に示す。複数音源における立体角の分割は、単一音源に比べて荒くなり、その境界線は複雑な曲線を描いている。図7の立体角の分割を数値シミュレーションにそのまま組み込むと、到来した反射音がどの立体角の範囲に入るかの判定が複雑になり、計算時間の増大につながるため好ましくない。そこで、各立体角の範囲を水平角、仰角のみで表現できるように単純化した。図8に単純化した立体角の分割の様子を示す。得られた立体角の分割は水平面より上方のみであるが、コンサートホールのバルコニ席では下方より到来する反射音についても考慮しなければならない。そこで、仰角 $-30 \sim 0$ 度までは水平面に対して対称として分割した。

以上のように作成した立体角分割の様子を図9に示す。立体角の分割数は、全体で106分割である。また、立体角に対応する頭部伝達関数は、保有する約1400方向の測定結果から、分割した立体角の中央付近に対応する頭部伝達関数を用いることとし、数値シミュレーションに組み込んだ。

2.4 両耳におけるインパルス応答の算出方法

図10に両耳におけるインパルス応答算出方法の概念図を示す。まず、数値シミュレーションにより、前項で作成した立体角内を通過して受音点に到達する方向別のインパルス応答を算出する。これに立体角に対応する左右一對の頭部伝達関数を畳み込むことにより、各立体角内を通過して受聴者の両耳へ到達するインパルス応答が得られる。分割した全立体角について同様にインパルス応答を求め、両耳における時系列上に順次重ね合わせていくことで、音場合成に必要な両耳におけるインパルス応答を得る。この両耳における左右一對のインパルス応答に、モノラルのドライソースをそれぞれ畳み込んで試聴用の音源ソースを作成し、OSS等のバイノーラル再生手法を用いて受聴者に立体的な音場を提示する。

3. 拡散状態に到達する時間の簡易的予測方法の検討

数値シミュレーションから合成した音場を用いて聴感上の検討を加えるためには、精度良く室内のインパルス応答を予測する必要があるが、精度を得ようとすると計算時間は増大し、また各種の境界条件に関するデータが十分に得られていない現状では、拡散音成分が主となる後期では、計算誤差が大きくなる傾向にある。

そのため、筆者らは初期反射音部分に反射音時間構造を考慮した残響音を付加し、聴感上において実際の残響音と聴感上の差が生じないような残響音付加手法を検討してきた⁶⁾。残響音付加手法の検討の際には実音場での正四面体頂点法を用いた短時間指向拡散度測定結果⁷⁾を参考に、残響音を付加する直接音からの時間を決めてきたが、数値シミュレーションによる初期反射音に残響音を付加する場合、設計対象としたホールにおいて、どの時点で拡散に移行するかを予測する必要性がある。

3.1 拡散状態に到達したとみなせる時間の簡易的予測手法

音場が拡散している条件として、次の2つがあげられる。

- (1) 音のエネルギーが室内全体に一樣に分布している。
- (2) 音があらゆる方向に等しい確率で伝搬している。

図10 数値シミュレーションからの両耳におけるインパルス応答算出

図11 キューブ分割方法

この2つの条件に関し、時間のパラメータを考慮するため、拡散状態に到達したと見なせる時間の予測には、室内における波面の位置、進行方向およびエネルギーを把握しやすい音線法を用いることとした。また、波面積分法においても、波面を追跡するためのガイドとして音線を用いているため、音線法を用いた拡散までの時間の予測ルーチンを波面積分法に組み込めば、数値シミュレーション内部で初期反射音の計算打ち切り時間が明確にできる。

室内における音のエネルギー分布を検討するため、図11に示すようにホールの客席部分に一辺2.5mの立方体(キューブ)を隙間無く並ぶように配置した。配置するキューブが壁面、バルコニー等と重なり、形状が完全に保たれない時は、その位置のキューブは作成しない。このようにして、室内の客席部分に同じ大きさ・体積のキューブを作成し、舞台上の音源位置から音線を放射する。音線が壁面で反射する際は、壁面の500Hz帯域の残響室法吸音率を音線の持つエネルギーに乗じた分だけ音線のエネルギーが減少するとして、波頭面を構成する全音線の位置とエネルギーを追跡することで、時間ごとに各キューブ内に位置する500Hz帯域のエネルギーを求めた。そして、全キューブ内の標準偏差を、偏差の最大値で正規化したものを室のエネルギー偏差とした。

音線の伝搬方向について見るために、ある時刻に作成した各キューブ内に存在する全方向ベクトルを単位ベクトルとしてベクトル合成し、X、Y、Z軸方向成分に分けてその時間変化を示した。さらに各キューブ内の全時間の最大値で正規化したベクトル合成値の時間変化を用いて、各キューブごとに音の伝搬方向がどの程度の時間で均一に移行するかを検討した。

エネルギー偏差およびベクトル合成値は、0から1.0までの値をとり、最大値に到達した後は拡散するに従い0に近づいていく。エネルギー偏差の時間変化は、一つの空間に対して一つだけであるが、ベクトル合成値の時間変化は、作成したキューブの数だけ得られる。そのうち予測に用いるのはインパルス応答を計算する受音点を含むキューブのみである。受音点を含むキューブのみを予測に用いるため、空間全体としての拡散状態に到達する時間の予測ではなく、個々の受音点近傍の空間についての拡散状態に到達する時間の予測となる。実際のホールにおいても、室中央とバルコニー下では拡散状態に到達する時間は異なると考えられ、各受音点に対しそれぞれ拡散にいたる時間を予測する必要があると考えられる。

3.2 本手法による残響室における拡散状態に到達する状況の検討

現在得られる最も拡散性のよい室の例として、残響室があげられる。前述の手法を用いた場合、拡散状態がどの様に表現されるかを検討するため、残響室を対象に予測計算を試みた。用いた残響室の形状および計算に用いた音源位置を図12に示す。音源の高さは床から1.5mとし、音源から16万本の音線を放射し、10回反射まで追跡した。作成したキューブは合計9個であり、キューブ1～5は床面から1.25mを中心に、キューブ6～9は床面から3.75mを中心として作成した。

図13に得られたベクトル合成値の時間変化を、音が放射された時刻を0msec.として示す。これを見ると、キューブ2およびキューブ6は約20msec.で大きな変動はなくなり、この時のベクトル合成値の相対値は約0.1～0.2である。なお、120msec.程度から変動が小さくなり、ベクトル合成値が0に近づくのは、音線が10回まで反射し、消滅していつているためであるが、100msec.程度までは放射し

図12 残響室平面および音源位置

図13 残響室におけるベクトル合成値の時間変化

図14 残響室におけるエネルギー偏差の時間変化

図15 予測に用いたホール

たすべての音線が確保されている時間帯である。図14にエネルギー偏差を示す。ベクトル合成値でそれ以降の時間で大きな変動のなくなる20～30msec.について見ると、0.1前後で安定している。

以上より、本手法において、ベクトル合成値による相対値では0.2程度以内、エネルギー偏差では相対値0.1程度を目安とすることで、拡散にいたる時間の算出が可能となると考えられる。

3.3 実測値と予測値の比較

予測手法の実音場への適用について検討するため、実際のホールで測定された短時間指向拡散度と本手法による予測値を比較した。

対象としたホールは、2000人規模の大型のコンサートホールであり、平面形がシューボックス型、一部扇形型、ワインヤード型と異なる3つのホールを用いた。図15に用いたA, B, Cホールの平面形および音源・受音点位置を示す。作成したキューブの数は、Aホールで331個、Bホールで407個、Cホールでは327個であり、音線放射本数は約16万本である。ベクトル合成値の時間変化は、受音点を含むキューブについて検討した。

3ホールにおける実測の短時間指向拡散度から、拡散状態に到達したとみなされる時間は表2のようになる⁷⁾。

Aホールの計算結果を図16に示す。ベクトル合成について、その変化幅が0.2以内に収まる時間について検討すると125msec.である。また、エネルギー偏差が相対値0.1以下となる時間は180msec.である。表2の実測値と比較すると、ベクトル合成では55msec.早く、エネルギー偏差では同程度となっている。

Bホールの計算結果を図17に示す。ベクトル合成は210msec.で実測値より70msec.早く、エネルギー偏差は240msec.で40msec.早くなっている。しかし、ベクトル合成、エネルギー偏差からの算定値は双方とも実測の拡散時間と同様にA, Cホールより遅くなっている。

Cホールの計算結果を図18に示す。ベクトル合成は100msec.で実測より40msec.早く、エネルギー偏差は130msec.と10msec.早くなっている。また、ベクトル合成、エネルギー偏差からの算定値は双方とも実測の拡散時間と同様にA, Bホールより早くなっている。

本手法において、ベクトル合成およびエネルギー偏差から算定した拡散にいたる時間には3ホールとも、ホール間で実測と同様な差が生じている。実測の短時間指向拡散度との比較では、本手法によって算定した時間のほうが早くなる傾向を示した。そこで、ベクトル合成また

はエネルギー偏差のどちらか遅いほうの値を拡散状態に到達したと見られる時間として選択し、その時間をもって残響音を付加することとした。

なお、本論文で用いている反射音時間構造を考慮した残響音付加手法⁶⁾は、拡散状態に到達したと見なされる時刻より、50msec.間の反射音列に基づいて残響音を作成するため、本手法によって得られた時間より50msec.だけ長くインパルス応答を計算する必要がある。

4. 数値シミュレーションからの音場合成

音場合成システムは、個々の音響物理指標値からは把握しにくい音場の特性を受聴者に正確に提示するのが目的であるから、数値シミュレーションから合成される音場と実際の音場との聴感上の差異が問題となる。そこで、これまで検討してきた立体角の分割方法、拡散にいたる時間の簡易的予測を含む反射音時間構造を考慮した残響音付加手法の検討結果を音場合成システムとして統合し、数値シミュレーションからの合成音場と実測音場との聴感上の差異について比較聴感実験を行った。

4.1 用いた数値シミュレーション手法について

音場合成に必要なインパルス応答を精度良く予測するため、筆者らは波動性を考慮した手法である波面積分法⁵⁾を用いている。波面積分法では、長時間インパルス応答による計算時間の増大を抑えるため、直接音到達時刻から300msec.経過ごとに追跡する波面の分割数を順次半減する等の実用上の工夫がなされているが、なお音響設計支援システムの演算系の中で大きな割合を占めている。そのため、反射音時間構造を考慮した残響音付加手法⁶⁾を用い、全時間インパルス応答算出に要する時間の短縮を図る必要があった。

4.2 数値シミュレーションの初期反射音への残響音付加

反射音時間構造を考慮した残響音付加手法⁶⁾は、まず拡散状態に到達したと見なされる時間から、50msec.間の反射音同士の時間間隔による度数分布から、残響音全体の反射音時間構造を作成する。ついで、作成した反射音時間構造に基づき頭部伝達関数、周波数特性の時間変化、またエネルギー減衰を考慮して左右一対の両耳における残響音を作成し、初期反射音に付加する。この手法が数値シミュレーショ

表2 実測の短時間指向拡散度から求めた拡散に到達する時間

Aホール	180msec.
Bホール	280msec.
Cホール	140msec.

図16 Aホールにおける予測結果

図17 Bホールにおける予測結果

図18 Cホールにおける予測結果

ンに対して、同様に適用できるかを検討した。

図19に波面積分法によるシューボックス型ホールの1階中央付近における無指向性受音のインパルス応答計算結果を示す。また図20の上側に、図19の計算結果から正四面体頂点法の手法により変換したエネルギーパルス応答を、下側にエネルギーパルス応答から算出した反射音時間間隔の時間変化を、このホールにおいて拡散状態に到達したとみなされる180msec.以降について示す。図20の反射音時間間隔の時間変化を見ると、波面積分法においては直接音到達時刻から300msec.経過ごとに追跡する波面の分割数を半減させているため、インパルス応答後期になるほど反射音時間間隔が大きくなっている。反射音時間構造を考慮した残響音作成手法によれば、拡散状態に到達したと見なされる時点から、50msec.間の反射音が得られれば、その反射音時間間隔の度数分布から残響音全体の反射音時間構造が作成できる。波面積分法による直接音から300msec.までは、最も細かい波面の分割により精度が確保されている時間内であり、この50msec.間の反射音から残響音全体の反射音時間構造を作成すれば、残響音の反射音時間構造を精度よく作成できると考えられる。

図21に当ホールにおいて、拡散状態に到達したと見なされる直接音到達後180msec.から50msec.間の反射音により得られた反射音時間間隔の度数分布を、実測による度数分布と合わせて示す。数値シミュレーションからの度数分布は、実測と同様な指数分布を示しており、反射音時間構造を考慮した残響音を初期反射音に付加する手法を

図19 無指向性受音によるインパルス応答計算結果

図20 数値シミュレーションからのエネルギーパルス応答および反射音時間間隔

図21 実測と数値シミュレーションとの反射音時間間隔による度数分布の比較

数値シミュレーションに対しても適用できるものと考えられる。

4.3 実測音場との比較聴感実験

数値シミュレーションの初期反射音に反射音時間構造を考慮した残響音を付加した全時間インパルス応答からの合成音場の聴感上の精度を検討するため、実測音場等との比較聴感実験を行った。

図22に対象としたA、Dホールの音源、受音点位置を示す。なお、残響音を付加する直接音からの時間は、簡易的予測手法による計算結果からAホールは180msec.、Dホールは200msec.である。図23に実験に用いたダミーヘッドによる実測のインパルス応答と数値シミュレーションによる両耳におけるインパルス応答の例として、Aホールのバルコニーにおける応答をLch.について示す。数値シミュレーションによるインパルス応答には、実測との比較のため、測定に用いた12面体スピーカの特性を畳み込んでいる。

表3に実験に用いた音場を示す。比較聴感実験に用いる音源として、弦楽四重奏曲「ディベルティメント」第三楽章の10秒を用いた。実験は一対比較法により、各受音点ごとに表3に示す4音場を2秒間の間隔において一対とした12対に回答の信頼性をチェックするため

図22 計算に用いたホールおよび受音点位置

図23 実測と数値シミュレーションのインパルス応答例(R3)

の同一音場同士の一対を加え、合計 13 対の試験音を作成した。再生はイヤースピーカを用いた OSS⁹⁾ により、無響室内で行い、表 4 に示す評価項目について、表 5 に示す 5 段階のカテゴリによって評価させた。被験者は成人男女 13 名で、再生レベルは約 65dB(A) とし、正面方向の頭部伝達関数の補正データを用いて正面定位の改善を図った⁹⁾。全実験を通して、同一音場対に対して「明らかに先または後の音場」と評価した被験者はなく、13 名全員の回答結果についてシェッフェの一対比較法¹⁰⁾ により分析した。

図 2 4 に A ホールにおける 4 音場に対する心理尺度構成値を示す。全体的な傾向を見ると、数値シミュレーションにより全時間インパルス応答を計算した音場 4 は、他の音場とは逆傾向の有意な差が生じている。また、実測音場 1 と数値シミュレーションの初期反射音に実測の残響音を付加した音場 2 は、同様の傾向を示していることから、音場 4 が他の音場と聴感上の有意な差が生じた原因は主に残響音の違いによる見られ、数値シミュレーションによる残響音が聴感上滑らかな減衰をせず、高周波数成分が強く感じられたためと考えられる。数値シミュレーションの初期反射音に反射音時間構造を考慮した残響音を付加した音場 3 は、音場 4 に比べて実測音場 1 との聴感上の差異が改善されており、実測の残響音を付加した音場 2 と同様の傾向を示している。図 2 5 に D ホールにおける心理尺度構成値を示す。これを見ると、D ホールにおいても数値シミュレーションからの音場 4 は他の音場と有意な差が生じているが、音場 2、3 は実測音場 1 と同様の傾向を示している。

以上の結果から、これまで検討してきた残響音付加手法を数値シミュレーションに対して適用することで、数値シミュレーションからの合成音場の聴感上の精度改善が図れることが示された。

5. まとめ

今後も、数値シミュレーションの精度向上を図るとともに、再生方法を含む音場合成システムの改良を続け、数値シミュレーションからの合成音場の精度向上を図っていきたい。

謝辞

本研究に御協力頂いた吉田俊也氏(元日本大学大学院生、現日本電気コンストラクション)、佐藤正之氏(元日本大学大学院生、現建材試験センタ)、佐藤豊成氏(日本大学大学院生)に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) たとえば、宮島 徹、田原靖彦、中川 清：散乱音シミュレータを導入した室内音場合成システム、日本音響学会講演論文集、p715-716(平成2年9月)
- 2) イェンス ブラウエルト、森本政之、後藤敏幸編著：空間音響、p54-55
- 3) 飯田一博、杉浦 聡、森本政之：音場再生における空間分割の基礎的研究みかけの音源の幅に基づいた方法、日本音響学会講演論文集、p833-834(1992)
- 4) 浜田晴夫：基準的収音・再生を目的とするOrthostereophonic Systemの構成、日本音響学会誌、vol139, p337-348(1983)
- 5) 坪井政義：散乱波を考慮した室内音場のインパルス応答予測計算法、日本建築学会計画系論文集、No. 503, p1-7(1998)
- 6) 渡辺充敏、木村 翔、山口 順、平野 滋：OSSを用いた音場合成のための残響音付加手法の検討、日本建築学会計画系論文集、No. 503, p9-15(1998)
- 7) 羽入敏樹、木村 翔、橋本 修、坂本吉宏：音場の過渡応答に着目した拡散性の検討、日本建築学会計画系論文集、No. 471, p11-18(1995)
- 8) 吉田 実、下平美奈子、三浦種敏、浜田晴夫：イヤースピーカを用いた新しいOSS再生方式、AESコンベンション'91, p138-141(1991)
- 9) 山口 順、木村 翔、渡辺充敏、平野 滋：頭部近傍に設置したスピーカによる音場再生手法の検討、日本建築学会大会学術講演会梗概集、p211-212(1996)
- 10) 芳賀敏郎、橋本茂司：実験データの解析(1) 日科技連

表3 比較聴感実験に用いた音場

1. 実測音場
2. 数値シミュレーション初期反射音+実測残響音
3. 数値シミュレーション初期反射音+
反射音時間構造を考慮した残響音
4. 数値シミュレーション

表4 評価項目

- どちらの音場が
- A. 響きが豊かですか？
 - B. 拡がり感がありますか？
 - C. 音のはざれがよいですか？
 - D. 自然な音色ですか？

表5 5段階の評定尺度

図24 Aホールにおける心理尺度構成値

図25 Dホールにおける心理尺度構成値

(1999年3月10日原稿受理, 1999年9月9日採用決定)